

# Исследование влияния aberrаций на качество изображения в оптических системах

А.В. Кожевников<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

## Аннотация

Данная работа представляет исследование влияния и компенсации aberrаций в оптических изображающих системах при помощи наложения поверхностей, описываемых полиномами Цернике. Целью является исследование способов компенсации aberrаций и их эффективности при работе с aberrациями разных типов. Исследование производится в пакете Zemax путем моделирования оптической изображающей системы и пропускания через нее тестовых изображений.

**Ключевые слова:** волновые aberrации; полиномы Цернике; изображающие оптические системы

## 1. Введение

Aberrация оптической системы – это искажения изображений, которые возникают на выходе из оптической системы. Название происходит от лат. aberratio - уклонение, удаление. Искажения состоят в том, что оптические изображения не полностью соответствуют предмету. Это проявляется в размытости изображения и называется монохроматической геометрической aberrацией либо окрашенности изображения - хроматической aberrацией оптической системы. Чаще всего оба вида aberrации проявляются вместе.

В приосевой (параксиальной) области оптическая система работает практически идеально, точка отображается точкой, а прямая - прямой и т.д. Однако, по мере отдаления точки от оптической оси, лучи от нее пересекаются в плоскости изображения не в одной точке. Таким образом, возникает круг рассеивания, т.е. возникают aberrации. Величину aberrации можно определить путем расчёта по геометрическим и оптическим формулам через сравнение координат лучей, а также приближённо при помощи формул теории aberrаций [1].

Существует описание явления aberrации как в лучевой теории (отступление от идентичности описывается через геометрические aberrации и фигуры рассеивания лучей), так и в представлениях волновой оптики (оценивается деформация сферической световой волны по пути через оптическую систему). Обычно, для характеристики оптических систем с большими aberrациями используются геометрические aberrации, в противном случае применяются представления волновой оптики.

Как правило, анализ волновых aberrаций выполняется на основе полиномов Цернике [1-4]. В работах [5-8] было предложено использовать многоканальные дифракционные оптические элементы для оптического разложения волнового фронта по базису полиномов Цернике. Причем использование оптических элементов, согласованных не только с функциями Цернике, но и их суперпозициями, позволяет выполнять оптические измерения, обеспечивающие восстановление формы волнового фронта [9-11].

В данной работе выполнено исследование влияния aberrаций, описываемых полиномами Цернике, на изображающие свойства оптической системы с использованием пакета Zemax [12]. Целью работы является исследование способов компенсации aberrаций и их эффективности при работе с aberrациями разных типов.

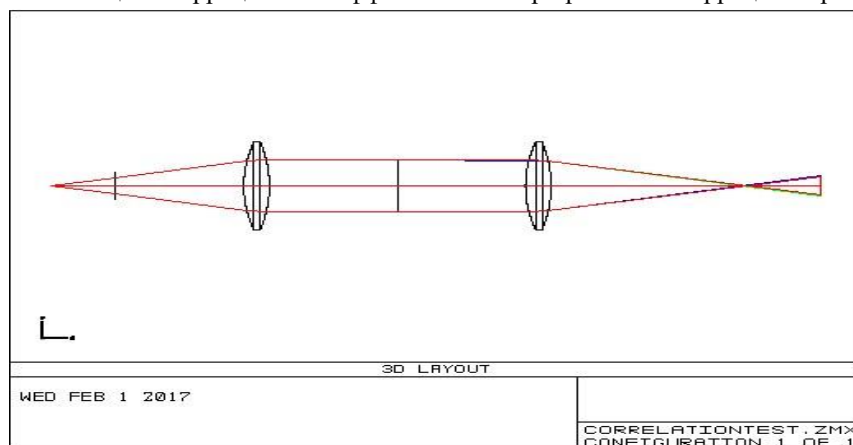


Рис.1. Двухмерная схема оптической системы.

## 2. Моделирование волновых aberrаций при помощи варьирования коэффициентов полиномиальной поверхности

Первым этапом будут смоделированы несколько поверхностей описываемых полиномами Цернике. Для данной части используется оптическая система, состоящая из двух рефракционных линз, на одной из которых находится исследуемая поверхность. Через систему пропускается свет с длинами волн 450, 550 и 650нм. В качестве оценки aberrационных искажений рассматривается изображение латинской буквы «F», пропущенное через описанную оптическую систему. Наибольший интерес представляют коэффициенты – «Zernike standard coefficients».

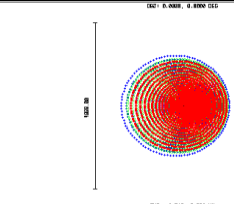
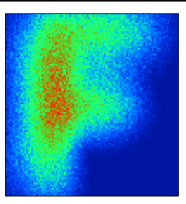
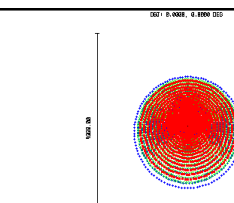
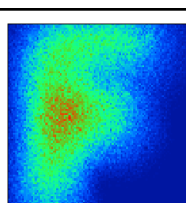
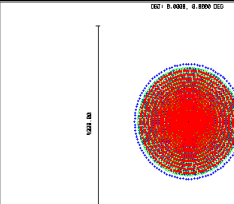
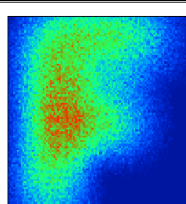
Есть чётные и нечётные полиномы Цернике. Чётные полиномы определены как:  $Z_n^m(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \cos(m\varphi)$ , а нечетные как:  $Z_n^{-m}(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \sin(m\varphi)$ . Где m и n неотрицательные целые числа, такие, что  $n > m$ ,  $\varphi$  — азимутальный угол, а  $\rho$  — радиальное расстояние  $0 \leq \rho \leq 1$ . Полиномы Цернике ограничены в диапазоне от -1 до +1.

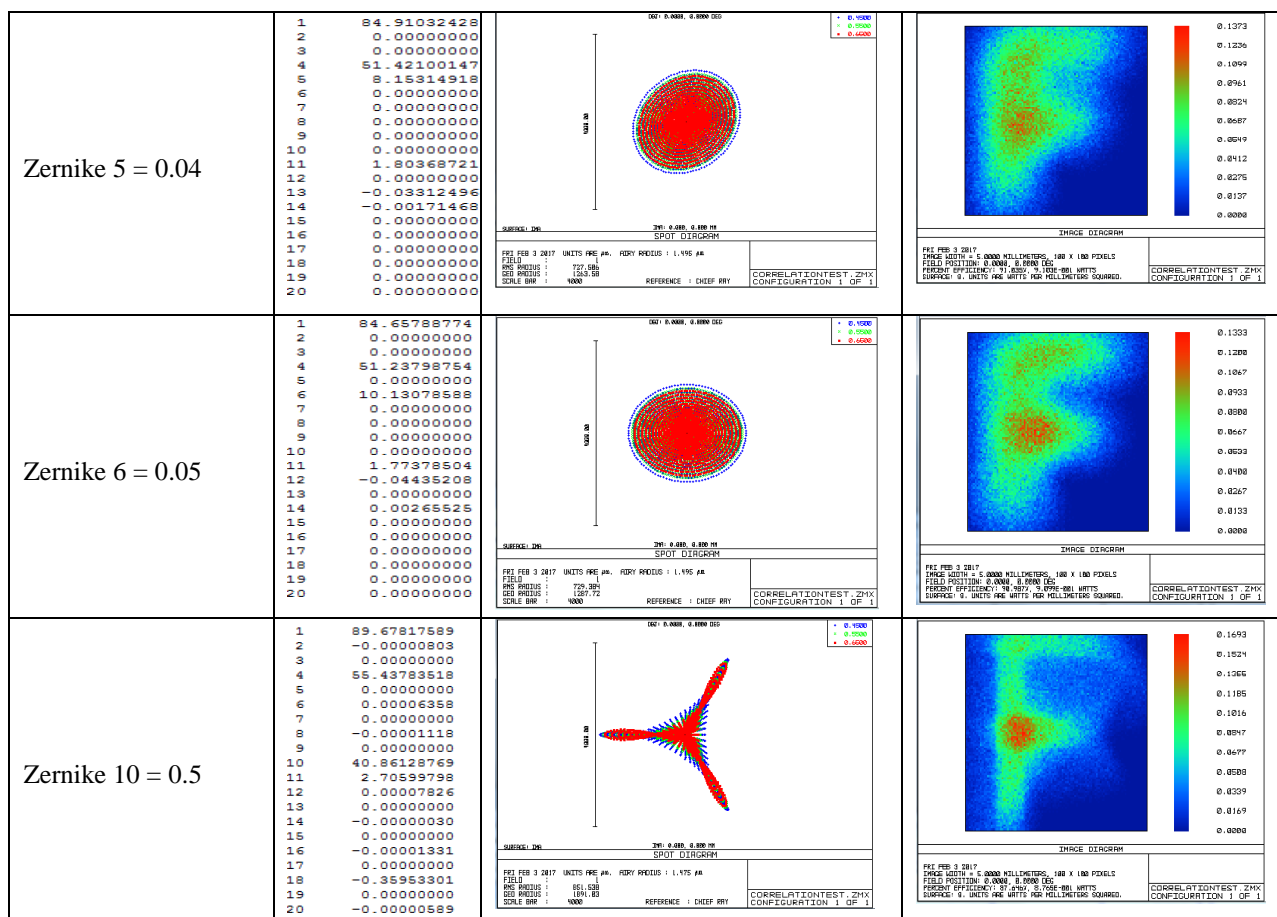
Радиальные полиномы определяются как:  $R_n^m(\rho) = \sum_{k=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! \left(\frac{n+m}{2} - k\right)! \left(\frac{n-m}{2} - k\right)!} \rho^{n-2k}$  Ортогональность полиномов Цернике дает им большие преимущества при анализе aberrаций по сравнению со степенным базисом. Основными преимуществами являются:

- 1) Абсолютные значения коэффициентов разложения по полиномам Цернике уменьшаются с увеличением степени полиномов, то есть ряд Цернике, как правило, всегда сходится, чего нельзя утверждать о степенном ряде;
- 2) Каждый коэффициент ряда дает вклад aberrации данного типа и порядка в общую волновую aberrацию с позиции взаимного баланса всех типов aberrаций. Это означает, что отдельные типы aberrаций, представленные разложением по полиномам Цернике, влияют на качество изображения совершенно независимо друг от друга.

В каждом отдельном случае берутся коэффициенты разных порядков, от 1го до 10го, им присваиваются максимальные значения, при которых тестовое изображение сохраняет исходный контур и четкость. Параметр «Zernike max term» задается равным 16, он отвечает за количество задаваемых параметров для полиномиальной поверхности.

Таблица.1. Результат моделирования волновых aberrаций разложением в ряд Цернике

| Значение и порядок задаваемого коэффициента | «Zernike standard coefficients»  | Диаграмма рассеяния точки «Spot diagram»  | Тестовое изображение после пропускания через моделируемую систему.                    |
|---|--|---|---|
| Zernike 2 = 1.3                             | <pre> 1 86.94863798 2 8.92983662 3 0.00000000 4 52.85124147 5 0.00000000 6 0.18081250 7 0.00000000 8 3.1856717 9 0.00000000 10 0.22819496 11 1.99700646 12 0.18851551 13 0.00000000 14 0.00394574 15 0.00000000 16 0.00884830 17 0.00000000 18 0.00672670 19 0.00000000 20 0.00058664                     </pre>     |  |  |
| Zernike 3 = 1.0                             | <pre> 1 86.04342006 2 0.00000000 3 5.59445929 4 52.23036902 5 0.00000000 6 0.01166767 7 1.99456561 8 0.00000000 9 -0.06688107 10 0.00000000 11 1.92430631 12 -0.08080670 13 0.00000000 14 0.00188636 15 0.00000000 16 0.00000000 17 0.00372627 18 0.00000000 19 -0.00191672 20 0.00000000                     </pre> |  |  |
| Zernike 4 = 0.008                           | <pre> 1 87.70230255 2 0.00000000 3 0.00000000 4 53.03219018 5 0.00000000 6 0.00000000 7 0.00000000 8 0.00000000 9 0.00000000 10 0.00000000 11 1.80228316 12 0.00000000 13 0.00000000 14 0.00000021 15 0.00000000 16 0.00000000 17 0.00000000 18 0.00000000 19 0.00000000 20 0.00000000                     </pre>    |  |  |



Как видно из таблицы 1, варьирование коэффициентов полиномиальной поверхности приводит к искажениям на диаграмме рассеяния точки и на тестовом изображении, пропускаемом через тестовую систему.

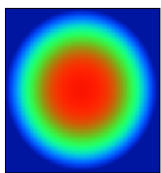
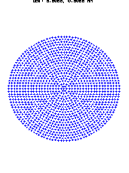
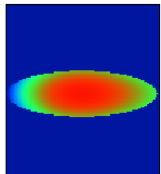
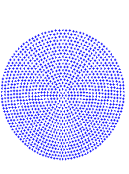
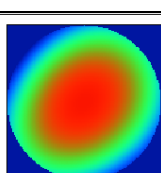
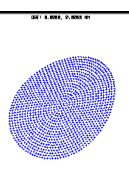
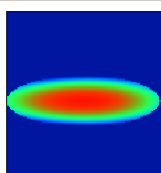
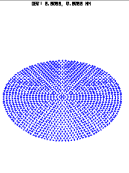
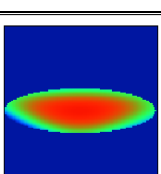
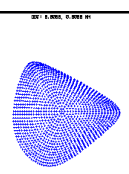
### 3. Исследование компенсации aberrаций в оптической системе

В данном разделе проводится исследование компенсации aberrаций в тестовой оптической изображающих системе при помощи наложения поверхностей, описываемых полиномами Цернике. Целью является поиск предельной эффективности компенсации волновых aberrаций путем добавления второй полиномиальной поверхности. Эффект достигается за счет комплексной сопряженности полиномов.

Используемая оптическая система состоит из двух зеркал, расположенных под некотором углом друг к другу, и вспомогательной параксиальной поверхности, используемой для распараллеливания входящего светового пучка. На обоих зеркалах располагаются полиномиально описываемые поверхности.

Таблица 2. Результат компенсирования волновых aberrаций

| Значения коэффициентов основной и компенсирующей поверхностей. | «Zernike standard coefficients»  | Карта волнового фронта.   | Диаграмма рассеяния точки «Spot diagram»   |
|--|--|---|--|
| 2й порядок<br>Zernike 1 = 22<br>Zernike 2 = 22                 | <pre> Z 1 -635.73327097 Z 2 0.00000010 Z 3 0.00000000 Z 4 -367.08864763 Z 5 0.00000000 Z 6 0.00000000 Z 7 0.00000000 Z 8 -0.00000003 Z 9 0.00000000 Z 10 -0.00000002 Z 11 -0.03709060 Z 12 0.00000000 Z 13 0.00000000 Z 14 0.00000000 Z 15 0.00000000 Z 16 0.00000002 Z 17 0.00000000 Z 18 0.00000001 Z 19 0.00000000 Z 20 0.00000002 </pre> |  <p>WAVEFRONT DIAGRAM</p> <p>FILE: MAR 5 2017 UNITS: MIC. IN. FOCUS: 1.195 IN.<br/>FIELD POSITION: 0.0000, 0.0000 DEG.<br/>FIELD SIZE: 128.00 X 128.00 MIC. IN.<br/>SURFACE: 0. UNITS PER MIC. IN. FOR MILLIMETERS SQUARED.<br/>CORRELATION TEST: ZHXY CONFIGURATION: 1 OF 1</p> |  <p>SPOT DIAGRAM</p> <p>FILE: MAR 5 2017 UNITS: MIC. IN. FOCUS: 1.195 IN.<br/>FIELD POSITION: 0.0000, 0.0000 DEG.<br/>FIELD SIZE: 128.00 X 128.00 MIC. IN.<br/>SURFACE: 0. UNITS PER MIC. IN. FOR MILLIMETERS SQUARED.<br/>CORRELATION TEST: ZHXY CONFIGURATION: 1 OF 1</p> |

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 3й прорядок<br>Zernike 1 = 10<br>Zernike 2 = 10   | Z 1 -643.87679565<br>Z 2 0.00000000<br>Z 3 0.00000000<br>Z 4 -371.78217736<br>Z 5 0.00000000<br>Z 6 0.00000000<br>Z 7 -0.00000003<br>Z 8 0.00000000<br>Z 9 0.00000003<br>Z 10 0.00000000<br>Z 11 -0.03853468<br>Z 12 0.00000000<br>Z 13 0.00000000<br>Z 14 0.00000000<br>Z 15 0.00000000<br>Z 16 0.00000000<br>Z 17 0.00000000<br>Z 18 0.00000000<br>Z 19 0.00000000<br>Z 20 0.00000000                 |     |     |
| 4й порядок<br>Zernike 1 = 1.3<br>Zernike 2 = 1.3  | Z 1 -537.97787897<br>Z 2 0.00000000<br>Z 3 -154.41057438<br>Z 4 -310.35880764<br>Z 5 0.00000000<br>Z 6 177.11633271<br>Z 7 -54.5724235<br>Z 8 0.00000000<br>Z 9 49.67569126<br>Z 10 0.00000000<br>Z 11 0.19062547<br>Z 12 0.23027790<br>Z 13 0.00000000<br>Z 14 -0.83171289<br>Z 15 0.00000000<br>Z 16 0.00000000<br>Z 17 0.01070882<br>Z 18 0.00000000<br>Z 19 0.02044444<br>Z 20 0.00000000           |    |    |
| 5й порядок<br>Zernike 1 = 1.0<br>Zernike 2 = 1.0  | Z 1 -661.32641050<br>Z 2 -16.08281281<br>Z 3 -24.18273705<br>Z 4 -381.96874395<br>Z 5 -144.52988374<br>Z 6 0.47726697<br>Z 7 -8.53856129<br>Z 8 -5.65637385<br>Z 9 5.6498830<br>Z 10 16.47765958<br>Z 11 -0.11745932<br>Z 12 0.12289812<br>Z 13 -0.04410014<br>Z 14 -0.10619428<br>Z 15 0.02143110<br>Z 16 -0.00013510<br>Z 17 0.00615966<br>Z 18 -0.00007495<br>Z 19 -0.00635697<br>Z 20 0.00488021    |    |    |
| 6й порядок<br>Zernike 1 = 1.0<br>Zernike 2 = 1.0  | Z 1 -636.95149995<br>Z 2 0.00000000<br>Z 3 4.17438084<br>Z 4 -402.51959586<br>Z 5 0.00000000<br>Z 6 -1.62.39979094<br>Z 7 1.50470917<br>Z 8 0.00000000<br>Z 9 -17.57482110<br>Z 10 0.00000000<br>Z 11 -0.10459243<br>Z 12 0.15195028<br>Z 13 0.00000000<br>Z 14 0.00750577<br>Z 15 0.00000000<br>Z 16 0.00000000<br>Z 17 0.01570550<br>Z 18 0.00000000<br>Z 19 -0.00658975<br>Z 20 0.00000000           |    |    |
| 10й порядок<br>Zernike 1 = 1.0<br>Zernike 2 = 1.0 | Z 1 -693.59874312<br>Z 2 43.14131352<br>Z 3 -32.07688039<br>Z 4 -416.87052236<br>Z 5 24.29308290<br>Z 6 23.61726878<br>Z 7 -17.85472572<br>Z 8 16.35792059<br>Z 9 4.94299591<br>Z 10 -101.59634856<br>Z 11 -12.58039299<br>Z 12 8.97828396<br>Z 13 7.07558058<br>Z 14 14.01367091<br>Z 15 -16.94562426<br>Z 16 0.61819900<br>Z 17 -3.43159284<br>Z 18 -1.52872307<br>Z 19 0.91258667<br>Z 20 0.62860773 |  |  |

Как видно из таблицы 2, добавление второй поверхности Цернике, позволяет компенсировать моделируемые aberrации в оптической системе.

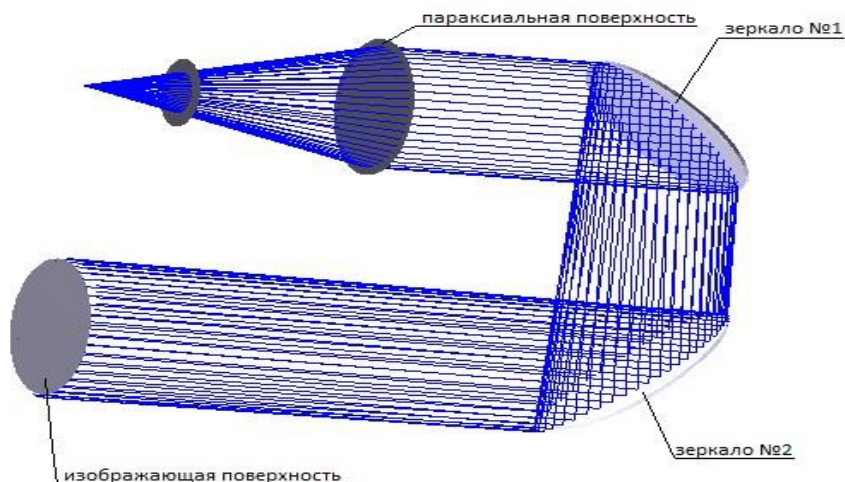


Рис.2. Оптическая система из двух зеркал.

#### 4. Заключение

В данной работе было проведено разложение волновых aberrаций в ряд Цернике. Были смоделированы волновые aberrации различных типов и рассмотрено их влияние на качество изображения в оптических системах.

Смоделирована оптическая система из двух зеркал с двумя полиномиальными поверхностями. Первая поверхность была использована для моделирования самих aberrаций, вторая использовалась для их компенсации. Используемый принцип основан на комплексной сопряженности полиномов.

Проведено исследование возможности компенсации волновых aberrаций наложением поверхностей, описываемых полиномами Цернике. Были получены максимальные значения aberrаций, поддающихся сравнительно эффективной компенсации за счет использования полиномиальных поверхностей.

Исследование было произведено в пакете Zemax путем моделирования тестовых оптических изображающих систем, и пропускания через них тестовых изображений.

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ.

#### Литература

- [1] Вольф, Э. Основы оптики / Э.Вольф, М. Борн // –1973. – М.: Наука.
- [2] American National Standards Institute, Inc. American National Standards for Ophthalmics – Methods for Reporting Optical Aberrations of Eyes. ANSI Z80.28 (2004) .
- [3] Бездидько, С.Н. Оптимизация оптических систем с использованием ортогональных полиномов. // Оптика и спектроскопия.1980.том 48.с.1222-1224.
- [4] Бездидько, С.Н., Методологические аспекты применения полиномов Цернике в вычислительной оптике, Сб. тр. Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения Нобелевского лауреата Академика А.М. Прохорова. Фундаментальные основы инженерных наук, 2006.
- [5] Khonina, S.N., Kotlyar, V.V., Soifer, V.A., Wang, Y., Zhao, D. Decomposition of a coherent light field using a phase Zernike filter, Proceedings of SPIE 3573, 550-553 (1998) .
- [6] Ha, Y., Zhao, D., Wang, Y., Kotlyar, V.V., Khonina, S.N., Soifer, V.A. Diffractive optical element for Zernike decomposition, Proceedings of SPIE 3557, 191-197 (1998) .
- [7] Khonina, S.N., Kotlyar, V.V., Wang, Ya. Diffractive optical element matched with Zernike basis, Pattern Recognition and Image Analysis, 11(2), 442–445 (2001) .
- [8] Porfirev, A.P. Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions / A.P. Porfirev, S.N. Khonina // Proceedings of SPIE. –2016. –Vol. 9807. –P.9 .
- [9] Kotlyar, V.V., Khonina, S.N., Soifer, V.A., Wang, Y., Zhao, D. Coherent field phase retrieval using a phase Zernike filter, Компьютерная оптика, 17, 43-48 (1997) .
- [10] Khonina, S.N. Zernike phase spatial filter for measuring the aberrations of the optical structures of the eye / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, D.V. Kirsh // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. – 2015. – Vol. 1, Issue 2. – P. 146-153.
- [11] Хорин, П.А., Хонина, С.Н., Карсаков, А.В., Бранчевский, С.Л. Анализ aberrаций роговицы человеческого глаза, Компьютерная оптика, 40(6), с. 810-817 (2016) .
- [12] Zemax® User's Guide // Zemax Development Corporation. – 2005.